

Présentation des moyens de compensation

Les limites actuelles des réseaux de transport de l'électricité peuvent être repoussées par l'ajout de nouvelles capacités de transport et/ou production. Cependant, les exploitants de réseaux cherchent des moyens pour utiliser plus efficacement les lignes de transport existantes. Cela nécessite :

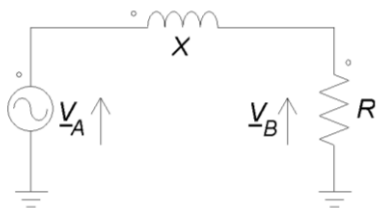
- d'améliorer le régime permanent des lignes longues, en autorisant des flux d'énergie beaucoup plus importants que ceux imposés par la seule limite de stabilité ;
- d'améliorer, dans les réseaux fortement maillés, les flux d'énergie imposés par les charges. Le flux naturel, résultant des impédances de lignes, n'est pas forcément celui qui minimise les pertes.

On voit dans l'exercice 7 que :

- le contrôle de la tension au point B permet d'augmenter la capacité de transport de la ligne ;
- l'angle de transport maximum, imposé par la stabilité du réseau, constitue la restriction majeure qui empêche de transporter la puissance que laisse envisager la limite thermique des lignes ;
- la modification de l'impédance de ligne permet d'augmenter la capacité de transport de puissance au-delà de la limite imposée par la stabilité.

De plus, si cette impédance est contrôlée, on pourra régler les impédances de ligne et ainsi imposer les flux d'énergie dans les réseaux maillés.

Pour une ligne inductive alimentant une charge résistive



on écrit $P_B = V_B \cdot I = P_A$ et $I = \frac{V_A}{X} \cdot \sin \theta$ (cf. Ex 7 A.2.4)

Régulation de l'excitation des rotors des alternateurs

Régulation du plan de tension

$$P_A = P_B = \frac{V_A V_B}{X} \cdot \sin \theta \quad (1)$$

Contrôle de l'impédance de ligne

Contrôle de l'angle de transport

- Le réglage du plan de tension est assuré par des compensateurs de puissance réactive placés en différents points du réseau. Ce sont des compensateurs parallèles.
- Ce sont des transformateurs déphaseurs qui maintiennent l'angle de transport dans la plage de stabilité.
- Le contrôle de l'impédance de ligne est effectué par des compensateurs séries.

Parmi ces compensateurs, on trouve de nouveaux systèmes adaptatifs, appelés FACTS (Flexible AC Transmission System), associant des condensateurs, des bobines et des composants d'électronique de puissance. En plus d'assurer le contrôle comme le font les structures classiques, leur temps de réponse très court leur permet d'améliorer les régimes dynamiques qui surviennent suite à des défauts sur les réseaux.

Les compensateurs parallèles

Les compensateurs parallèles permettent le contrôle de la tension en un point du réseau grâce à l'injection de puissance réactive (cf. la problématique du gestionnaire de réseau). Ces compensateurs sont connectés entre phase et terre.

Il en existe de plusieurs types :

- Compensateur synchrone
- Condensateurs
- Compensateur statique de puissance réactive (CSPR) de la famille des FACTS.

Les compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des moteurs synchrones tournant à vide, dont l'excitation est réglée pour fournir ou absorber la puissance réactive qui permet, par son transit en un point du réseau, d'ajuster la tension de ce point.

Avec les performances dynamiques qu'exige un haut niveau de sûreté du réseau, les compensateurs synchrones sont des moyens d'actions privilégiés.

Très employés en France dans les années 1950 et 1960, les compensateurs ont été délaissés ensuite au profit des condensateurs qui sont devenus plus compétitifs par suite des progrès techniques réalisés dans les films diélectriques très minces.

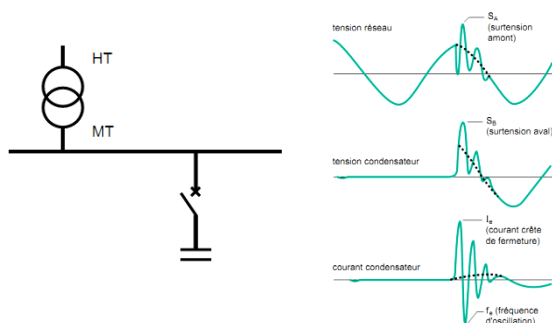
Les compensateurs synchrones ont toutefois conservé un rôle important dans les pays à lignes longues et peu maillées où, en plus d'un programme d'échange d'énergie réactive, ils assurent le maintien de la stabilité dynamique par leurs caractéristiques mieux adaptées à ce rôle que celles des condensateurs (inertie, réactance transitoire faible, régulation rapide d'excitation). Ils sont encore utilisés aux États-Unis, au Canada, en Russie et au Brésil où ils ont atteint, vers 1975, environ 10 % de la puissance apparente du réseau, mais, même dans ces pays, ils sont progressivement supplantés par les compensateurs statiques.

Les condensateurs actionnés par disjoncteur

MSC : Mechanically Switched Condensator

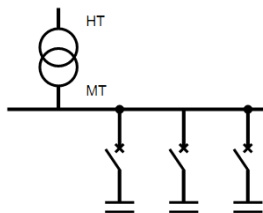
1. Condensateur unique

Le condensateur est manœuvré par un disjoncteur.

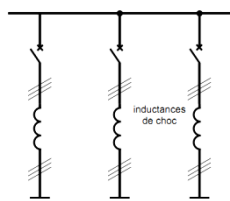


- + L'architecture est simple.
- Il y a des phénomènes transitoires à la mise sous tension.
- La puissance réactive injectée est nulle ou maximale.
- Afin de limiter les surtensions, il faut respecter un temps de 5 minutes entre deux manœuvres.
- ➡ Une première amélioration consiste à fractionner le condensateur en gradins.

2. Gradin de condensateurs.



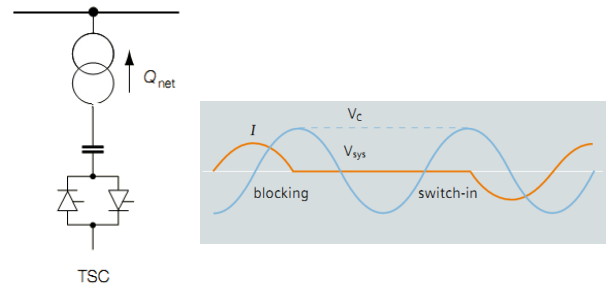
- + Les surtensions sont plus faibles.
- Les surintensités sont plus élevées.
- ➡ On diminue les surintensités en plaçant des inductances séries.



Les condensateurs commutés par thyristors

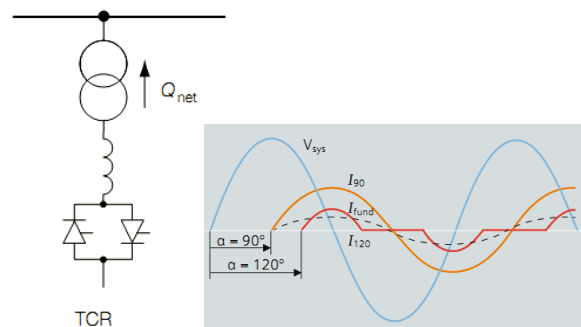
TSC : Thyristor Switched Condensator

Le condensateur n'est pas commandé en phase mais simplement enclenché et déclenché un nombre entier de $\frac{1}{2}$ périodes.

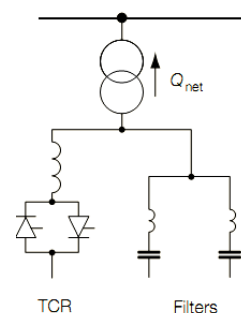


- + Grâce à la précision du réglage de l'instant de mise en conduction des thyristors, la plupart des phénomènes transitoires sont supprimés.
- + On peut actionner le dispositif un grand nombre de fois par jour.
- La puissance réactive injectée n'est pas modulable.
- ➡ On va moduler la puissance réactive du dispositif grâce à une inductance réglable.

Cette inductance réglable est du type avec noyau dans l'air et commandée en phase par deux thyristors tête-bêche : **TCR Thyristor Controlled Reactor**



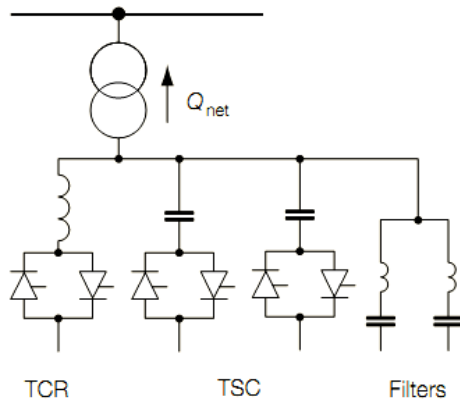
- + Il n'y a pas de phénomènes transitoires à la mise sous tension.
- + La puissance absorbée peut être ajustée de Q_{Lmax} à 0 en réglant α .
- Pour les angles supérieurs à 90° , ce dispositif génère des harmoniques.
- ➡ On ajoute des filtres harmoniques.



Compensateur statique de puissance réactive

SVR : Static Var Compensator

On arrive alors à la structure suivante :



Chaque branche du TSC permet d'injecter la puissance réactive Q_C . Le TCR absorbe la puissance réactive Q_L ajustable de Q_{Lmax} ($= -Q_C$) à 0. Ainsi on peut ajuster graduellement la puissance réactive injectée de 0 à $2Q_C$.

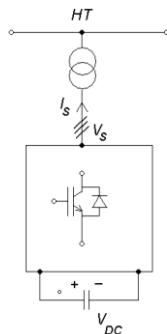
De plus, lorsque les TSC sont déclenchés et en commandant simplement le TCR, ce compensateur absorbe de la puissance réactive. Cela permet, lorsque le réseau est peu chargé, d'éviter les remontées en tension sur les lignes.

Pour piloter le SVC, le gestionnaire de réseau envoie une tension de consigne au SVC. Classiquement la puissance réactive injectée par les SVC est réglable de -100 Mvar à +200 Mvar. Grâce au temps de réponse très faible, le SVC améliore les régimes transitoires des lignes en cas de court-circuit, de réjection de charges...

Compensateur synchrone statique

STATCOM : Static Synchronous Compensator

Le STATCOM est composé d'une source d'énergie continue, ou d'un condensateur, associé à un convertisseur statique à base de semi-conducteurs du type IGBT. Ce convertisseur permet de régler le niveau V_s de la tension en sortie du convertisseur et de maintenir le courant de sortie I_s en quadrature avec V_s .



- + Injection de puissance réactive ($V_s < V_{HT}$)
- + Absorption de puissance réactive ($V_s > V_{HT}$)
- + Filtrage actif d'harmoniques : $I_s = I_q - I_2 - I_3 - I_4 - I_5 \dots$

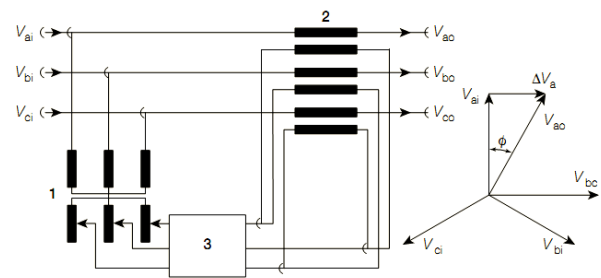
- + Equilibrage dynamique des charges (lorsque la charge triphasée de la ligne est déséquilibrée).
- + Stabilisation dynamique de la tension au point de raccordement.
- + Atténuation des oscillations de puissances.

Les transformateurs déphaseurs

PST : Phase Shifting Transformer

Ils agissent sur l'angle de transport θ . Avec le contrôle de l'angle de transport, c'est l'amplitude et la direction du flux de puissance qui peuvent être réglées (voir relation (1)).

Le déphasage s'obtient par extraction d'une partie de la tension simple, injectée sur une autre phase. La structure du transformateur est représentée ci-dessous :



Déphaseur avec injection de tension perpendiculaire

- 1 Transformateur de magnétisation
 - 2 Transformateur série
 - 3 Réseau de commutation
- ϕ Déphasage

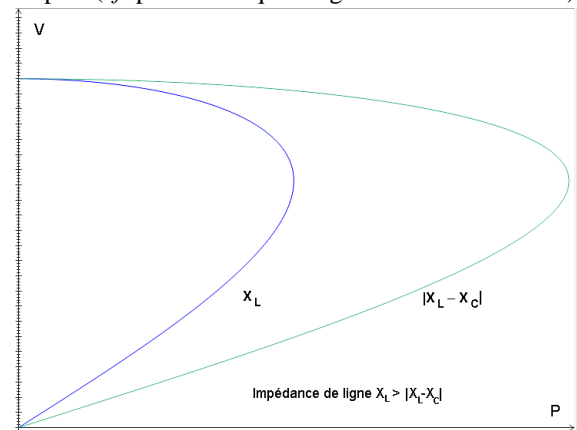
Le réseau de commutation permet de sélectionner différentes configurations de report des tensions simples. Des cellules à thyristors y supplantent les systèmes de prises mécaniques.

Les compensateurs séries

Les compensateurs série permettent de modifier l'impédance de ligne.

Condensateur série

En abaissant l'impédance de la ligne, on étend la zone de fonctionnement stable et on accroît les capacités de transport (cf. problématique du gestionnaire de réseau).

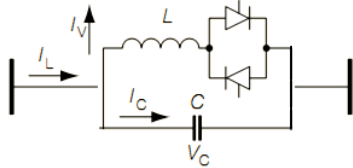


- + L'architecture est simple
- L'impédance de ligne n'est pas réglable.
- ➡ Des condensateurs de capacité ajustable permettent le réglage de l'impédance de ligne.

Condensateur série commandé par thyristors

TCSC : Thyristor Controlled Serie Condensator

En déviant, du courant I_C qui traverse le condensateur, une partie I_V dans une bobine commandée par des thyristors, on obtient un condensateur de capacité réglable : $X_C = U_C / I_L$. La structure est la suivante :



- + L'impédance de ligne est réglable.
- + On peut répartir les flux de puissances entre les lignes des réseaux maillés afin d'y minimiser les pertes.

Conclusion

Grâce à la maturité de l'électronique de puissance, de nouvelles structures de compensateurs apparaissent et rendent la gestion de l'énergie beaucoup plus souple.

Avec la décentralisation de la production de l'énergie, les réseaux intelligents, Smart Grid, font leur apparition. Ils ont pour rôle de gérer au mieux les flux de puissance et le stockage de l'énergie.

Bibliographie :

- Manœuvre et protection des batteries de condensateurs MT. Cahier Technique Schneider n° 189.
<http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/produits-services/cahiers-techniques/cahiers-techniques.page>
- FACTS : les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie. Revue ABB Mai 1999.
<http://www.abb.fr/cawp/abbzh254/699bd5d4cb7e7706c1256dab003085da.aspx>
- Discover the world of FACTS technology. SIEMENS.
http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/FACTS/FACTS_Technology.pdf
- Alternateurs hydrauliques et compensateurs. Techniques de l'ingénieur [D 3 540].
- Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive. Publication RESELEC 2002.
<http://electrotechnique-couffignal.site2.ac-strasbourg.fr/site-php/cours2007/realisation-compensateur.pdf>